



# 大学物理 实验

University Physics  
Experiment

主 编 钟春晓 龚小华

副主编 王锦丽 李 蓉 任喜梅



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

内容简介

# 大学物理实验

主 编 钟春晓 龚小华

副主编 王锦丽 李 蓉 任喜梅

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书是根据教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),针对理工科院校的特点与实验教学条件,并结合当前物理实验教学改革的情况和独立学院的要求编写而成的。

全书内容包含五个部分,即绪论、测量的基本概念与数据处理、物理实验基本仪器介绍、基础实验和综合设计性实验,收录了力学、热学、电磁学、光学和近代物理学的实验,基础实验都提供了较为详细的实验目的、实验原理、实验仪器、思考题、实验步骤、注意事项等。而综合设计性实验以启发性、研究性为目的,对实验仪器要求不高。

本书可以作为高等理工科院校各专业不同层次的物理实验教材或教学参考书,也可供涉及物理学的广大科技工作者或有关课程教师参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 钟春晓, 龚小华主编. -- 北京 :  
北京航空航天大学出版社, 2017.11

ISBN 978-7-5124-2576-7

I. ①大… II. ①钟… ②龚… III. ①物理学-实验  
—高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 254328 号

版权所有,侵权必究。

### 大学物理实验

主 编 钟春晓 龚小华  
副主编 王锦丽 李 蓉 任喜梅  
责任编辑 张冀青

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: [bhpress@263.net](mailto:bhpress@263.net) 邮购电话:(010)82316936

北京泽宇印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:710×1 000 1/16 印张:11.5 字数:245 千字

2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5124-2576-7 定价:30.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

# 前 言

大学物理实验是高等理工科院校课程体系中的一门重要的实践性基础课,是本科生进入大学以后最先接触的实践课程之一,是学生接受系统实验原理、方法和实验技能训练的一个开端,对培养学生的动手能力、分析问题和解决问题的能力以及严谨的科学态度等方面都起着至关重要的作用。

本书是根据教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010版),针对理工科院校的特点,结合当前物理实验教学改革的情况和实验仪器的现状编写而成的。

全书内容包括绪论、测量的基本概念与数据处理、物理实验基本仪器介绍、基础实验、综合设计性实验。本书的特点:在实验项目的编排上,由基础实验到综合设计性实验,由易到难、循序渐进,这样有利于学生对物理实验课程的学习和实验能力的培养。每个基础实验都设置了预习思考题,有益于学生在做实验之前,了解掌握实验的理论,确定实验的大概过程。综合设计性实验是在学生做了一定数量的基础实验后,为了培养学生自主进行科学实验的初步能力而设置的。设计性实验只提出研究对象和要求,并给予适当的提示,主要是让学生运用相关的综合知识自行确定实验方法、选择合适的仪器设备和设计一定的实验程序,自己加以实现并对结果进行分析处理。

参加本书编写工作的是华东交通大学理工学院物理教研室以及物理实验室的老师。其中:钟春晓编写了第一章、第二章、实验一到九,任喜梅编写了实验十到十二,李蓉编写了实验十三至十五,龚小华编写了实验十六到十九,王锦丽编写了实验二十到二十五以及附录。龚小华为本书初稿的录入做了大量的工作。钟春晓负责全书的统稿。

本书在编写的过程中,参考了部分兄弟院校的实验教材和部分仪器厂家的说明书,在此致以真诚的谢意!

由于编者的水平有限,加之时间仓促,书中难免有错误及欠缺之处,恳请读者批评指正。

编者

2017年8月

# 目 录

绪 论	1
第一章 测量的基本概念与数据处理	5
第一节 测量与仪器	5
第二节 有效数字和误差的计算	6
第三节 数据处理	20
第二章 物理实验基本仪器介绍	27
第一节 力学、热学实验仪器	27
第二节 光学实验仪器	33
第三节 磁电类仪器	41
第三章 基础实验	53
实验一 基本测量	53
实验二 拉伸法测金属丝的杨氏模量	56
实验三 气垫导轨上的实验	62
实验四 不良导体导热系数的测定	69
实验五 驻波法测波速	74
实验六 扭摆法测定刚体转动惯量	81
实验七 伏安特性曲线的测绘	85
实验八 电表的改装与校正	90
实验九 光电效应测普朗克常量	96
实验十 单缝衍射光强分布的测量	100
实验十一 示波器的使用	105
实验十二 惠斯通电桥测电阻	110
实验十三 模拟法测绘静电场	120
实验十四 用冲击法测螺旋线管磁场	127
实验十五 密立根油滴法测电子电荷	133
实验十六 薄透镜焦距的测定	138
实验十七 等厚干涉——牛顿环	142
实验十八 光栅衍射	148

实验十九 迈克尔逊干涉仪的调节与使用.....	151
<b>第四章 综合设计性实验.....</b>	<b>155</b>
实验二十 欧姆表的制作.....	156
实验二十一 细长导线电阻率的测量.....	160
实验二十二 单摆法测定重力加速度.....	161
实验二十三 简谐振动的研究.....	163
实验二十四 滑线变阻器特性的研究.....	165
实验二十五 折射率的测定.....	167
<b>附 录.....</b>	<b>171</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>175</b>
15.....	175
16.....	175
17.....	175
18.....	175
19.....	175
20.....	175
21.....	175
22.....	175
23.....	175
24.....	175
25.....	175
26.....	175
27.....	175
28.....	175
29.....	175
30.....	175
31.....	175
32.....	175
33.....	175
34.....	175
35.....	175
36.....	175
37.....	175
38.....	175
39.....	175
40.....	175
41.....	175
42.....	175
43.....	175
44.....	175
45.....	175
46.....	175
47.....	175
48.....	175
49.....	175
50.....	175
51.....	175
52.....	175
53.....	175
54.....	175
55.....	175
56.....	175
57.....	175
58.....	175
59.....	175
60.....	175
61.....	175
62.....	175
63.....	175
64.....	175
65.....	175
66.....	175
67.....	175
68.....	175
69.....	175
70.....	175
71.....	175
72.....	175
73.....	175
74.....	175
75.....	175
76.....	175
77.....	175
78.....	175
79.....	175
80.....	175
81.....	175
82.....	175
83.....	175
84.....	175
85.....	175
86.....	175
87.....	175
88.....	175
89.....	175
90.....	175
91.....	175
92.....	175
93.....	175
94.....	175
95.....	175
96.....	175
97.....	175
98.....	175
99.....	175
100.....	175

# 绪 论

物理学从本质上说是一门实验科学。物理规律的发现和物理理论的建立,都必须以严格的物理实验为基础,并受到实验的检验。例如,杨氏的干涉实验使光的波动学说得以确立;赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁场理论获得普遍承认,等等。当然,一些物理实验问题的提出,以及实验的设计、分析和概括也必须应用已有的理论。总之,历史表明,物理学的发展是在实验和理论两方面相互推动和密切结合下进行的。

大学物理实验作为工科类院校的一门课程,是学生进入大学后受到的系统的实验技能训练的开端,是后续课程实验的基础。

## 一、 大学物理实验课教学的目的和任务

1. 在具有一定的物理知识和中学物理实验的基础上,对学生进行物理实验方法和实验技能的基本训练。通过实验要求学生做到:弄清实验原理,了解一些物理量的测量方法;熟悉常用仪器的基本原理和性能,掌握其使用方法;能够正确记录、处理实验数据,分析、判断实验结果,并能写出比较完备的实验报告。

2. 培养并逐步提高学生观察和分析实验现象的能力以及理论联系实际的独立工作能力。通过实验的观察、测量和分析,加深对物理学的某些概念、规律和理论的理解,并进行实验方法、科学实验能力的训练和培养。包括:

(1) 自己查询资料或者教材,理解实验内容并做好准备工作;

(2) 通过教材和教师介绍,能正确调节并使用相关的实验仪器,观察实验现象,对实验中出现的现象能够有初步的分析和判断;

(3) 能够正确记录和处理实验的相关数据,并且能够对实验误差进行分析,写出规范的实验报告;

(4) 培养学生简单的综合设计能力,能够自行设计并完成简单的综合性实验。

3. 培养学生严格认真的工作作风、实事求是的科学态度,以及爱护财产、遵守纪律的优良品德。

## 二、 大学物理实验的特点

学生在物理实验课中主要是通过自己独立的实验实践来学习物理实验知识,培养实验能力,提高实验素养,这个学习任务决定了作为实验课程的物理实验有以下几

个特点:

1. 实验带有很强的目的性。无论是应用性实验还是探索性实验,几乎都是在已经确立的理论指导下的实践活动,在有限的时间内,不仅要完成实验课题(实验目的),而且还要完成学习任务(实验要求)。那种把实验课程看成是摆弄仪器、测测数据就达到目的的单纯实验观点是十分有害的。

2. 实验要采取恰当的方法和手段,以使所要观察的物理现象和过程能够实现,并达到符合一定准确度的定量测量要求。虽然方法和手段会随着科学技术和工业生产的进步而不断改进,但历史积累的方法是人类知识宝库精华的一部分,有了积累才能有创新,因此,从一开始就应十分重视实验方式知识的积累。

3. 实验中所包括的技能,内容十分广泛。仪器的选择、使用和保养,设备的装校、调整和操作,现象的观察、判断和测量,故障的检查、分析和排除,等等,都有众多的原则和规律,可以说它是知识、见解和经验的积累。唯有实践,既动手又动脑地不断实践,才有可能获得这种技能,单凭看书是不可能学到的。

4. 实验需要用数据来说明问题,数据是实验的语言。物理实验中,数据处理有各种不同的方法以及特定的表达方式。测量结果、验证理论、探索规律和分析问题,无一不用数据,它是学术交流和报告技术成果最有力的工具和最准确的语言。

实验集理论、方法、技能和数据于一个整体,它不但要实验者看懂实验内容和实验方法的道理,而且还要实验者根据这些道理付诸实现,最后还要从获得的数据结果中得出应有的结论,这就是物理实验的特点。

### 三、 大学物理实验的基本程序和要求

在做任何一个实验时,必须把握住以下三个重要环节。

1. 实验预习:预习至关重要,它决定着实验能否取得主动和收获的大小。预习包括阅读资料、熟悉仪器和写出预习报告。

仔细阅读实验教材和有关的资料,重点解决三个问题。

(1) 做什么:也就是这个实验最终要得到什么结果。

(2) 根据什么去做:是指实验课题的结论依据和实验方法的原理。

(3) 怎么做:包括实验的方案、条件、步骤及实验关键。

预习报告至少应该包括记录数据的表格、电路图或光路图,设计性实验要拟出实验方案。

2. 实验的进行:学生进入实验室按照编组使用相应的指定仪器。像一个科学工作者那样要求自己,井井有条地布置仪器,根据事先设想好的步骤演练一下,然后再按确定的步骤开始实验。要注意细心观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题。不要期望实验工作会一帆风顺,要把遇到问题看成是学习的良机,冷静地分析和处理

它。仪器发生故障时,也要在教师指导下学习排除故障的方法。总之,要把重点放在实验能力的培养上,而不是测出几个数据就以为完成了任务。

要做好完备而整洁的记录:例如研究对象的编号,主要仪器的名称、规格和编号;原始数据要用钢笔或圆珠笔记入事先准备好的表格中,即使记错,也不要涂改,应轻轻划上一道,在旁边写上正确值(错误多时,须重新记录),使正误数据都能清晰可辨,以便在分析测量结果和误差时参考。不要用铅笔记录,给自己留有涂抹的余地;也不要先草记在另外的纸上再誊写在数据表格里,这样容易出错,况且,这也不是“原始记录”了,希望同学们注意纠正自己的不良习惯,从一开始就培养自己良好的科学作风。

在实验结束后,先将实验数据交给教师审阅签字,然后再整理还原仪器,经教师验收没有问题后,方可离开实验室。实验记录要求认真仔细、实事求是,不允许伪造数据,也不允许抄袭他人的记录。

3. 实验总结:实验后要对实验数据及时进行处理。如果原始记录删改较多,应加以整理,对重要的数据要重新列表。数据处理过程包括计算、作图、不确定度计算和误差分析等。计算要有计算式(或计算举例),代入的数据都要有根据,便于别人能够看懂,也便于自己检查。作图时要按作图规则,图线要规矩、美观。数据处理后应给出实验结果。

完整的实验报告,通常包括下列几个部分:

- (1) 实验名称;
- (2) 实验目的;
- (3) 仪器设备;
- (4) 简要原理或计算公式;
- (5) 实验数据;
- (6) 计算或作图;
- (7) 误差分析;
- (8) 实验结果;
- (9) 讨论。

误差分析包括两方面的内容:一是确定实验结果的误差范围,因为在精确测量中判定实验结果的不准确范围跟获得实验结果具有同等的重要性;二是找出影响实验结果的主要因素,从而采取相应的措施(例如,合理选择仪器,实现最有利的测量条件等)以减小误差。显然,对于不同的实验,因为所用的实验方法或所测量的物理量不同,误差分析的方式亦不尽相同。误差过大时,应分析原因,对误差作出合理的解释。

在表达实验结果时,一般包括不可分割的三部分,即结果的测量值  $\bar{A}$ 、绝对误差  $\Delta A$  和相对误差  $E_r$ ,综合起来可写为

$$A = (\bar{A} \pm \Delta A) \text{ 单位}; \quad E_r = \frac{\Delta A}{\bar{A}} \times 100\%$$

如果实验是观察某一物理现象或验证某一物理定律,则只需扼要地写出实验的结论。

在最后的讨论中,包括回答实验的思考题、实验过程中观察到的异常现象及其可能的解释,以及对于实验仪器装置和实验方法的建议等。还可以谈实验的心得体会,但不要求每个实验都写心得体会,有则写,没有则不要勉强。

### 三、大学物理实验的基本程序和要求

大学物理实验的基本程序和要求如下:

1. 预习实验,了解实验目的、原理、方法和步骤。
2. 检查仪器,了解仪器的使用方法和注意事项。
3. 进行实验,记录实验数据。
4. 处理数据,计算实验结果。
5. 撰写实验报告。

大学物理实验的要求如下:

1. 实验前要认真预习,了解实验目的、原理、方法和步骤。
2. 实验过程中要认真观察,记录实验数据。
3. 实验结束后要认真整理实验数据,计算实验结果。
4. 实验报告要写得清楚、准确、完整。
5. 实验过程中要注意安全,遵守实验室规章制度。

# 第一章 测量的基本概念与数据处理

## 第一节 测量与仪器

在物理实验中,有一些基本的概念必须要掌握,例如:测量、误差、有效数字和数据处理等概念。测量是物理实验的主要工作,测量操作的合理与否,直接决定了实验结果是否有意义。数据处理是对实验测量的数据进行分析 and 整理,找出物理量之间的数学关系,从而得出物理规律。

### 一、测量的基本概念

#### (一) 测量

测量是指为确定被测量对象的量值而进行的被测物与仪器相比较的实验过程。一个物理量的测量结果就是得出被测量的量值,它应包括两部分:数值和单位(不标出单位的数值不能是量值)。

例如,一桌子的长度与米尺相比,得出桌子长度为 1.248 m;一铁块的质量与砝码相比(通过天平),得出铁块质量为 31.852 g。

#### (二) 测量的分类

按照测量方法,测量分为直接测量与间接测量。

① 直接测量:指被测量和仪器直接比较,得出被测量量值的测量。前面的二例均为直接测量。

② 间接测量:指由一个或几个直接测量经已知函数关系计算出被测量量值的测量。例如,测量单摆的摆长  $L$  和振动周期  $T$ ,由公式  $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$  算出重力加速度  $g$  值的过程就是间接测量。

### 二、实验仪器

测量仪器是指用以直接或间接测出被测对象量值的所有器具,如游标卡尺、天平、停表、惠斯通电桥、电表、示波器、频率计等。

一个国家的最准确的计算器具有一些主基准,在全国各地则有由主基准校准过的工作基准,实验室使用的仪器已直接或间接用工作基准进行校准过。

测量时是以仪器为标准进行比较,故要求仪器准确,不过由于测量的目的不同,对于仪器准确程度的要求也不同,比如称量金戒指的天平必须准确到 0.001 g,而一

般超市卖粮的台秤差几克无关紧要。为了适应各种测量对仪器的准确程度的不同要求,国家规定工厂生产的仪器分为若干准确度等级。各类各等级的仪器,又有对准确程度的具体规定。例如1级螺旋测微计,测量范围小于50 mm,最大误差不超过 $\pm 0.004$  mm;又如1.0级电流表,测量范围为0~500 mA,最大误差不超过 $\pm 5$  mA。

实验时要恰当地选取仪器。仪器使用不当对仪器和实验均不利。表示仪器的性能有许多指标,其中最基本的是测量范围和准确度等级。当被测量超过仪器的测量范围时,首先对仪器会造成损伤,其次可能测不出量值(如电流表),即使勉强测出(如天平),误差也会增大。对仪器准确度等级的选择也要恰当,一般是在满足测量要求的条件下,尽量选用准确度低的仪器。减少准确度高的仪器的使用次数,可以减少在反复使用时的损耗,延长其使用寿命。

## 第二节 有效数字和误差的计算

### 一、有效数字

实验中总要记录很多数值,并进行计算,但是记录时应取几位,运算后应留几位,这是实验数据处理的重要问题,必须有一个明确的认识。

实验时处理的数值,应能反映出被测量的实际大小,即记录与运算后保留的应为能传递出被测量实际大小信息的全部数字,这样的数字称为有效数字。实验中接收的数字,那些传递了被测量大小信息的有效数字应予保留,否则应舍弃。

#### (一) 仪器读数、记录与有效数字

一般地讲,仪器上显示的数字均为有效数字,均应读出(包括最后一位数字)并记录。例如,用一最小分度为1 mm的尺子,测得一物体的长度为76.2 mm,其中“7”和“6”是准确读出的,最后一位数字“2”是估计的,并且仪器本身也会在这一位出现误差,所以它存在一定的可疑成分,即实际上这一位可能不是“2”,虽然读数“2”不十分准确,但还是近似地反映出这一位大小的信息,还应算作有效数字。

仪器上显示最后一位数是“0”时,此“0”也是有效数字,也要读出并记录。例如,用1 mm分度尺测得一物体的长度为36.0 mm,它表示物体的末端与分度线“6”刚好对齐,下一位是“0”,这时若写成36 mm则不能肯定下一位是“0”。所以此“0”是有效数字,必须记录。另外,在记录时,由于选择单位的不同,也会出现一些“0”,例如,3.60 cm也可记为0.036 0 m或36 000  $\mu\text{m}$ ,这些由于单位变换才出现的“0”,没有反映出被测量大小的信息,不能认为是有效数字。在物理实验中常采用一种被称为标准式的写法,就是任何数值都只写出有效数字,而数量级则用10的幂数去表示,例如3.60 cm可写成 $3.60 \times 10^{-2}$  m或 $3.60 \times 10^4$   $\mu\text{m}$ 。

对于分度式的仪表,读数要读到分度的十分之一。例如,分度是1 mm的直尺,

测量时一定要估测到 0.1 mm 位;分度是 0.001 A 的安培计,测量时一定要估测到 0.000 1 A 位。但有的指针式仪表,它的分度较窄,而指针较宽(大于分度的五分之一),这时如果读到最小分度的十分之一有困难,则可以读到分度的五分之一甚至二分之一。

## (二) 运算后的有效数字

在讨论运算后有效数字位数的规则之前,先分析一个例子。

例如,测得一长方形的长为 15.74 cm,宽为 5.37 cm,求其面积。由一般算术计算的面积为  $84.5238 \text{ cm}^2$ ,这个数的 6 个数字是否都是有效数字呢?可以肯定,这两个直接测量值都具有一定的误差,而且误差不小于最后一位数的一个单位,假设它们的较准确值是 15.73 cm 和 5.36 cm,则算出的面积为  $84.3128 \text{ cm}^2$ 。这两个面积值明显不同,而且小数点后第一位就出现差异,由此可以认为只有前三位数字是传递出实际面积大小的信息的,而后三位数字则无意义。因此所求面积的有效数字位数只能取三位。

下面讨论运算后判断有效数字位数的一般规则。

(1) 实验后计算不确定度,根据不确定度来确定有效数字,是正确确定有效数字的基本依据。

不确定度只取一位或两位有效数字,测量值的数值的有效数字是到不确定度末位,和不确定度末位对齐。例如,用单摆测得重力加速度为

$$g = (981.2 \pm 1.8) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$$

不确定度取两位,测量值的有效数字的末位是和不确定度末位同一位的“2”。

(2) 实验后不计算不确定度时,测量结果有效数字位数只能按以下的规则粗略地确定。

① 加减运算后的有效数字 加减运算后的末位,应当和参加运算各数中最先出现的可疑位一致。

例如:

$$\begin{array}{r} 213.2\bar{5} \\ 16.\bar{7} \\ + \quad 0.12\bar{4} \\ \hline 230.0\bar{7}4 \end{array}$$

结果为 230.1(数字下有横线的是可疑数,仍算有效数字)。

② 乘除运算后的有效数字 乘除运算后的有效数字位数,可估计为和参加运算各数中有效数字最少的相同。

例如:

$$325.78 \times 0.0145 \div 789.2 = 0.00599$$

以上介绍的规则只是有效数字计算的一般原则,在实验中,由于测量和计算时各种因素的影响,会有特殊情况。例如:

$$\begin{array}{r}
 \times 31.1 \\
 \underline{4.1} \\
 311 \\
 + 1244 \\
 \hline
 127.51
 \end{array}$$

结果： $31.1 \times 4.1 = 128$ 。

如果按照规则②，最后结果应该取两位有效数字（即 12），但这个结果是错误的。因为 12 中的 2 是进位得来的，是属于准确数字，不是可疑数字，所以首位数字相乘大于 10 的数，有效数字应多取一位。

③ 三角函数、对数值的有效数字 测量值  $x$  的三角函数或对数的位数，可由  $x$  函数值与  $x$  的末位增加 1 个单位后的函数值相比较来确定。

例如： $x = 43^\circ 26'$ ，求  $\sin x$ 。

由计算器（或查表）求出

$$\sin 43^\circ 26' = 0.687\ 510\ 098\ 5$$

$$\sin 43^\circ 27' = 0.687\ 721\ 305\ 1$$

由此可知应取

$$\sin 43^\circ 26' = 0.687\ 5$$

### （三）使用有效数字规则时应注意的事项

① 物理公式中的数值，不是实验测量值。例如，测量圆柱体的直径  $d$  和长度  $L$ ，求其体积  $V$ ，公式  $V = \frac{1}{4}\pi d^2 L$  中的  $\frac{1}{4}$  不是测量值，在确定  $V$  的有效数字位数时不必考虑  $\frac{1}{4}$  的位数。

② 对数运算时，首位数不算有效数字。

③ 首位数是 8 或 9 的  $N$  位数值在乘除运算中，计算有效数字位数时，可多算一位。例如， $9.81 \times 16.24 = 159.3$ ，按 9.81 是三位有效数字，结果应取 159，但因为 9.81 的首位数是 9，可将 9.81 看作 4 位数，所以结果取 159.3。

④ 有多个数值参加运算时，在运算过程中应比按有效数字运算规则规定的位数多保留一位，以避免由于多次取舍引入计算误差，但运算最后仍应舍去。

例如：求  $3.144 \times (3.615^2 - 2.684^2) \times 12.39$ 。

$$3.144 \times (3.615^2 - 2.684^2) \times 12.39$$

$$= 3.144 \times (13.068 - 7.203\ 9) \times 12.39$$

$$= 3.144 \times 5.684 \times 12.39 = 228.4$$

数字上有下画线的不是有效数字，运算过程中保留它是为了减少舍入误差，这样的数称为安全数字。

#### (四) 数值的修约规则

运算后的数值只保留有效数字,其他数字应舍去,要舍弃的数字的第一位应按如下修约规则处理。

① 开始要舍去的第一位数是 1、2、3、4 时就舍去;是 6、7、8、9 时,在舍去的同时进 1。

例如:将下列数保留三位小数:

$$2.143\ 46 \rightarrow 2.143$$

$$2.143\ 72 \rightarrow 2.144$$

② 要舍去的一位是 5,而保留的最后一位为奇数,则舍去 5 进 1,如果要保留的最后一位是偶数则舍去 5 不进位,但是 5 的下一位不是零时仍然要进位。

例如:将下列数保留三位小数:

$$2.143\ 50 \rightarrow 2.144$$

$$2.144\ 50 \rightarrow 2.144$$

$$2.144\ 51 \rightarrow 2.145$$

## 二、 误差的计算

理想的测量是获得被测量在测量条件下的真值,但是实际上在测量时,由于实验方法和计算器具的不完善,测量环境不理想、不确定,实验者在操作上和读取数值上不十分准确等原因,都将使测量值偏离真值,因而测量值不能准确表达真值。在报告被测量的测量结果时,因为报告的是被测量的近似值,所以应同时报告对它的可靠性的评价,即给出对此测量质量的指标。测量不确定度就是测量质量的指标,也即是对测量结果残存误差的评估。

测量值不等于真值,可以设想真值在测量值附近的一个量值范围内,测量不确定度就是评定作为测量质量指标的此量值范围。设测量值为  $x$ ,其测量不确定度为  $u$ ,则真值可能在量值范围  $(x-u, x+u)$  中。显然,若此量值范围较窄,则测量不确定度就越小,用测量值表示真值的可靠性就越高。

对测量不确定度的评定,常以估计标准偏差表示其大小,这时称其为标准不确定度。

由于测量有误差,因而才要评定不确定度。误差的来源不同,它对测量的影响也不同,从测量值来看其影响,表现可分为两类:一类是偶然效应引起的,使测量值分散开,例如用手控制停表测摆的周期,由于手的控制存在偶然性,所以每次测量值不会相同;另一类则是测量值恒定地向某一方向偏移,重复测量时,此偏移的方向和大小不变,例如用电压表测一电阻两端的电压,由于这时偶然性很弱,反复测量其值基本不变,当用更精密的电势差计测量时,可以得知电压计的示值有恒定的偏差,这是电压计的基本误差所致。这两类影响都给被测量引入了不确定度,都要评定其标准不

确定度,但是评定的方法不同。

### (一) 标准不确定度的 A 类评定

由于偶然效应,被测量  $X$  的多次重复测量值  $x_1, x_2, \dots, x_n$  是分散的,从分散的测量值出发,用统计的方法评定标准不确定度,就是标准不确定度的 A 类评定。

设 A 类标准不确定度为  $u_A(x)$ ,用统计方法求出平均值的标准偏差

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

A 类评定标准不确定度(又称标准不确定度的 A 类分量)就取为平均值的标准偏差,即

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x})$$

按误差理论的高斯分布,如果不存在其他误差影响,则量值范围  $[\bar{x} - u_A(\bar{x}), \bar{x} + u_A(\bar{x})]$  中包括真值的概率为 68.3%;如果扩大量值范围为  $[\bar{x} - 1.96 u_A(\bar{x}), \bar{x} + 1.96 u_A(\bar{x})]$ ,则其中包括真值的概率为 95%。

### (二) 标准不确定度的 B 类评定

若误差的影响仅仅是测量值向某一方向有恒定的偏离,则这时不能用统计的方法评定不确定度。这一类的评定就是 B 类评定。

B 类评定,有的依据计量仪器说明书或检定书,有的依据仪器的准确度等级,有的则粗略地依据仪器分度值或经验。从这些信息中可以获得极限误差  $\Delta$ (或容许误差,或示值误差),此类误差一般可视为均匀分布,而  $\Delta/\sqrt{3}$  为均匀分布的标准差,则 B 类评定标准不确定度(又称标准不确定度的 B 类分量)为

$$u_B(x) = \Delta/\sqrt{3}$$

严格讲,从  $\Delta$  求  $u_B(x)$  的变换系数与实际分布有关,在此均近似按均匀分布处理。

**【例 1】** 使用量程 0~300 mm、分度值 0.05 mm 的游标卡尺测量长度时,按国家计量技术规范 JJG 30-84,其示值误差在 0.05 mm 以内,即极限误差  $\Delta = 0.05$  mm,则由游标卡尺引入的标准不确定度  $u_B(x)$  为

$$u_B(x) = 0.05 \text{ mm}/\sqrt{3} = 0.029 \text{ mm}$$

**【例 2】** 使用数字毫秒计测一时间间隔  $t$ ,按 JJG 602-89,其示值误差大  $\Delta$  在  $\pm$ (晶体频率准确度  $\times$  时间间隔  $t + 1$  个时标)范围内,频率准确度为  $1 \times 10^{-5}$ 。

当  $t = 2.157$  s 时,  $\Delta = (1 \times 10^{-5} \times 2.157 + 0.001)$  s  $\approx 0.001$  s,则由数字毫秒计引入的标准不确定度  $u_B(x)$  为

$$u_B(x) = 0.001 \text{ s}/\sqrt{3} = 0.00058 \text{ s}$$

### (三) 合成标准不确定度 $u_c(x)$ 或 $u_c(y)$

对一物理量测定之后,要计算测得值的不确定度,由于其测得值的不确定度来源不止一个,所以要合成其标准不确定度。